

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVALUACIÓN DE ESFUERZOS Y
DEFORMACIONES EN PAVIMENTO ASFALTICO MEDIANTE TEORIAS
LINEALES ELÁSTICAS Y VISCOELÁSTICAS**



**CAROLINA MARÍA CÓRDOBA ACOSTA
JULIO IGNACIO HEILBRON BUELVAS**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA**

2020

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EVALUACIÓN DE ESFUERZOS Y
DEFORMACIONES EN PAVIMENTO ASFALTICO MEDIANTE TEORIAS
LINEALES ELÁSTICAS Y VISCOELÁSTICAS**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil

**CAROLINA MARÍA CÓRDOBA ACOSTA
JULIO IGNACIO HEILBRON BUELVAS**

Tutor tesis

FREIRE PALOMINO PALMA

Co tutor tesis

ANDREA CASTRO CABEZA

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA**

2020

Notas de aceptación:

Firma jurado 1.

Firma jurado 2.

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a Dios por nuestras vidas y permitir cumplir nuestros sueños. A nuestras familias por su apoyo incondicional. A nuestros tutores por su compromiso o apoyo a lo largo del proceso de realización de este trabajo de grado y a nuestros amigos y profesores que de alguna u otra manera nos apoyaron durante todo el proceso.

Resumen

En la presente investigación, se pretende evaluar y comparar los cálculos de los esfuerzos y deformaciones en pavimento asfaltico mediante metodología lineal elástica y viscoelástica, teniendo en cuenta que actualmente en Colombia la mayoría de diseños de pavimentos se realizan siguiendo la metodología AASTHO 93 y posteriormente se realiza un análisis por metodología racional en la cual se calculan esfuerzos y deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica y en la parte superior de la subrasante con el fin de estimar la vida útil del pavimento por fatiga y ahuellamiento respectivamente. Sin embargo, estos análisis para determinar los esfuerzos y deformaciones en las estructuras diseñadas siguiendo AASHTO 93 se realizan con softwares y modelos lineales elásticos, los cuales simulan el material asfaltico como material con un módulo de elasticidad constante. No obstante, en la vida real se sabe que el asfalto tiene un comportamiento viscoelástico caracterizado con un módulo dinámico a través de una curva maestra, dicho comportamiento es distinto al asumido actualmente bajo métodos lineales elástico. Es así que en la presente investigación se analizaron 3 distintas estructuras de pavimento basada en 3 niveles de transito; y para estas estructuras se realizó el diseño por la metodología AASHTO 93 para determinar los espesores y luego se procedió a determinar las deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica (fatiga) y en la parte superior de la subrasante (Ahuellamiento), obteniendo como resultado que en el caso de la fatiga el análisis lineal elástico arroja unos resultados similares al análisis viscoelástico cuando este último se analiza a velocidades similares a 60 kph. Sin embargo, cuando el análisis viscoelástico se realiza a bajas velocidad, se obtiene una mayor deformación en el sistema viscoelástico en comparación con el elástico, dado que, a menor velocidad, el asfalto se desempeña con un menor modulo dinámico y por tanto generando más deformaciones. En este caso se estaría subestimado el comportamiento del pavimento si se tienen en cuenta bajas velocidades siguiendo modelos lineales elásticos. En el caso del

ahuellamiento, el análisis elástico arroja un valor inferior a cualquier análisis viscoelástico, quiere decir, que en todos los casos el ahuellamiento bajo el análisis elástico está siendo subestimado, debido al comportamiento real del asfalto (viscoelástico), dichos valores según modelos viscoelásticos son mayores. Por tanto, es de importancia realizar diseños de pavimentos asfálticos siguiendo un modelo viscoelástico teniendo en cuenta la velocidad de la vía para representar el comportamiento real en campo de los materiales del pavimento.

Palabras clave: esfuerzo, deformación, módulo dinámico, viscoelasticidad

Abstract

In this research, it is intended to evaluate and compare the calculations of the stresses and deformations in asphalt pavement using linear elastic methodology and viscoelastic methodology, taking into account that currently in Colombia most pavement designs are carried out with the AASTHO 93 methodology and later A rational methodology analysis is carried out in which stresses and deformations are calculated at the bottom of the asphalt layer and above the subgrade in order to estimate the useful life of the pavement due to fatigue and rutting respectively. However, these analyzes to determine the stresses and deformations in the structures designed by AASHTO 93 are carried out with softwares and linear elastic models, which simulate the asphalt material as a material with linear elastic behavior, described with a constant modulus of elasticity. However, in real life it is known that asphalt has a viscoelastic behavior characterized by a dynamic modulus through a master curve, this behavior is different from that currently assumed under linear elastic methods. Thus, in the present investigation 3 different pavement structures based on 3 levels of traffic were analyzed; and for these structures the design was carried out using the AASHTO 93 methodology to determine the thicknesses and then proceeded to determine the deformations at the bottom of the asphalt layer (fatigue) and above the subgrade (rutting), obtaining as a result that in the In the case of fatigue, the linear elastic analysis gives similar results to the viscoelastic analysis when the latter is analyzed at speeds similar to 60 kph. However, when the viscoelastic analysis is carried out at low speeds, a greater deformation is obtained in the viscoelastic system compared to the elastic system, since, at a lower speed, the asphalt performs with a lower dynamic modulus and therefore is generally more deformations. In this case, the behavior of the pavement would be underestimated if we have low speeds and we carry out the analysis with the elastic linear model. In the case of rutting, the elastic analysis gives a lower value than any viscoelastic analysis, which means that in all cases the rutting

under the elastic analysis is underestimated, since simulating the real behavior of asphalt (viscoelastic) the values still give mayor. Therefore, when it comes to designing asphalt pavements, it is important to obtain a characterization of the speed of the road and perform a viscoelastic analysis because it represents the real behavior in the field.

***KeyWords:* stress, deformation, dynamic module, viscoelasticity**

Tabla de contenido

Lista de tablas y figuras	10
1. Introducción	12
2. Objetivos	14
2.1 General	14
2.1 Específicos	14
3. Justificación	15
4. Estado del arte	16
4.1 Método AASTHO 93	16
4.2 Método racional diseño de pavimentos flexibles	25
5. Metodología	28
5.1 Transito de diseño	29
5.2 Materiales	29
5.3 Subrasante	29
5.4 Clima	29
5.5 Modelo lineal elástico	30
5.6 Modelo viscoelástico	31
6. Resultados	33
6.1 Diseño AASHTO 93	33
6.2 Análisis lineal elástico	36
6.3 Análisis viscoelástico	38
6.4 Análisis de resultados	40
7. Conclusiones y recomendaciones	43
8. Limitaciones	45
9. Referencias	46

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 4-1. Valores de serviciabilidad inicial	18
Tabla 4-2. Valores serviciabilidad final.....	19
Tabla 4-3. Recomendación de coeficientes estructurales según INVIAS	20
Tabla 4-4. Coeficientes de drenaje mi (recomendados por AASHTO 93).....	22
Tabla 4-5. Valores recomendados de confiabilidad según AASHTO 93	24
Tabla 4-6. Valores recomendados de desviación estándar según AASHTO 93.....	25
Tabla 4-7. Factores de calibración ecuaciones vida por Fatiga, Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012.....	27
Tabla 4-8. Factores de calibración ecuaciones vida por Faatiga, Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012.....	27
Tabla 6-1. Variables de diseño AASHTO 93, fuente elaboración propia	33
Tabla 6-2. Deformaciones calculadas con el análisis lineal	38
Tabla 6-3. Deformaciones calculadas con el análisis viscoelástico.....	39
Tabla 6-4. Cuadro comparativo de deformaciones	40

Figuras

Figura 4-1. Abaco para determinar el coeficiente estructural y de la base granular.....	21
Figura 4-2. Abaco para determinar el coeficiente estructural y de la subbase granular	21
Figura 4-3. Análisis de carga metodología racional	26
Figura 5-1. Temperatura promedio máxima barranquilla, tomado de CIOH	30
Figura 5-2. Resultado módulo de elasticidad asfalto, fuente BitProps	31
Figura 5-3. Curva maestra asfalto PG 58-28, Fuente 3D Move	32
Figura 6-1. Calculo AASHTO 93 Estructura 1, fuente AASHTO	34
Figura 6-2. Calculo AASHTO 93 Estructura 2, fuente AASHTO	35
Figura 6-3. Calculo AASHTO 93 Estructura 3, fuente AASHTO	35
Figura 6-4. Espesores obtenidos de AASHTO 93, Fuente elaboración propia	36
Figura 6-5. Carga y geometría del eje, Fuente WindePAV	36
Figura 6-6. Resultado de deformación estructura 1, fuente WindePAV	37
Figura 6-7. Resultado de deformación estructura 2, fuente WindePAV	37
Figura 6-8. Resultado de deformación estructura 3, fuente WindePAV	38
Figura 6-9. Resultados deformaciones 3D Move, Fuente 3D Move Analisis	39

Figura 6-10. Análisis de fatiga.....	41
Figura 6-11. Análisis de ahuellamiento	41

1. Introducción

Se entiende por pavimento como la estructura que se dispone sobre un segmento vial. Dicha estructura está compuesta por diferentes capas de diferentes espesores y diferentes materiales. De manera general existen tres tipologías de pavimentos los cuales son: Pavimento flexible, pavimento rígido y pavimento articulado. Los pavimentos Flexibles son los que están compuestos en su capa de rodadura por concreto asfaltico, por otro lado, los pavimentos rígidos son los que están compuestos por losas de cemento portland en su capa superior y finalmente los pavimentos articulados o también conocidos como pavimentos en adoquín, están compuestos por bloques prismáticos (adoquines) que se interconectan formando la capa superior del pavimento.

En Colombia, a lo largo de los años se han venido usando metodologías empíricas para diseño de estructuras de pavimento flexibles, tales como la metodología AASTHO 93 (Mora, O et al 2020), sin embargo, estos diseños son de carácter empírico, debido a que su metodología nació de una prueba a gran escala en estados unidos, donde a través de análisis estadístico, determinaron espesores de pavimentos.

Por tal razón, se procedió a formular una metodología empírico mecanicista para la verificación de los diseños de la metodología AASTHO, dicha metodología es conocida como la metodología racional de diseño de pavimentos flexibles. Esta metodología se basa en el cálculo de esfuerzo y deformaciones para determinar la vida por fatiga y por ahuellamiento en estructuras de pavimentos asfalticos.

Uno de los modos de fallas más antiguos en pavimento flexible es la fatiga (Moghaddam, et al, 2011, Usman, R et al ,2018). La fatiga en pavimento flexible son las grietas ocasionadas

en el inferior de la carpeta asfáltica que con el tiempo se reflejan en la superficie, ya sea de manera longitudinal, transversal (Principalmente debidas a cambios de temperatura) y que luego pueden llegar a convertirse en un sistema de grietas conocida como piel de cocodrilo. La vida por fatiga en pavimento se rige por las deformaciones a tensión generadas en el fondo de la carpeta asfáltica, debido a que, si las deformaciones generadas por el tránsito vehicular, supera a la deformación máxima permitida por el concreto asfaltico, se fatiga el pavimento y se da inicio a la formación de las grietas.

Por otro lado, el ahuellamiento es una manifestación tanto de la deformación permanente, como una forma de deterioro en los pavimentos flexibles, el diseño del pavimento debe orientarse a eliminar o reducir la formación de ahuellamiento en el pavimento durante un período determinado. El criterio de ahuellamiento se basa en limitar la deformación vertical producida en la parte superior de la subrasante, debido a que, si la deformación aplicada es superior a la deformación permitida por la subrasante, se produce ahuellamiento. (Ekwulo & Eme, 2009)

La mayoría de los modelos analíticos utilizados para el diseño de pavimentos flexibles se basan en la teoría elástica lineal que asume que cada capa es homogénea, isotrópica, linealmente elástica con un módulo de elasticidad constante y la capa superficial está libre de esfuerzos cortantes y normales. (Nagakumar, N, 2013)

Sin embargo, se hace interesante conocer la respuesta del pavimento asfaltico en términos de esfuerzos y deformaciones, teniendo en cuentas teorías viscoelásticas, con el fin de comparar con los métodos lineales elásticos tradicionales.

2. Objetivos

2.1 General

Evaluar las diferencias en los cálculos de los esfuerzos y deformaciones en estructuras de pavimento flexibles bajo análisis lineales elástico y viscoelásticos

2.1 Específicos

- Caracterizar 3 diferentes tipos de estructuras de pavimentos siguiendo la metodología contemplada en la AASTHO 93.
- Evaluar esfuerzos y deformaciones bajo condiciones lineales elásticas
- Evaluar esfuerzos y deformaciones bajo condiciones viscoelásticas
- Realizar un análisis comparativo de las metodologías evaluadas

3. Justificación

La red vial de Colombia es fundamental para el crecimiento y desarrollo económico, social y cultural del país, dado que posibilita el transporte de las personas y las cargas.

En Colombia se muestra un problema serio en cuanto a infraestructura vial debido a que se presentan vías con deterioros acelerados luego de su construcción, lo cual no facilita el desarrollo del país, si no que por el contrario genera atrasos y sobre costos de mantenimiento, rehabilitación y/o reconstrucción de vías.

Los diseños de pavimento juegan un papel fundamental a la hora de la construcción de una vía, en este proceso interactúan variables que deben ser muy bien caracterizadas; tales como el tránsito, el material de soporte de suelo natural (subrasante), los materiales de las capas y por su puesto el clima.

Debido a esto, la presente investigación pretende evaluar los diseños de pavimento mediante la metodología racional utilizando el comportamiento viscoelástico de materiales, haciendo de esta manera diseños que se asemejen a la realidad, los cuales los hace más confiables a la hora de construir.

Así mismo, se tendrá en cuenta las propiedades de los materiales que afectan la durabilidad y resistencia de dichas estructuras, tales como la temperatura, propiedades viscoelásticas del asfalto, cargas dinámicas, deterioro del pavimento y tiempo de carga. bien sabiendo que la mayoría de las vías en Colombia están construidas en pavimento asfáltico y sus diseños se basan en INVIAS 2013 que a su vez se basa en AASTHO 93.

4. Estado del arte

En esta sección del proyecto, se tratarán las principales metodologías de diseño de pavimento asfáltico como la AASTHO 93 y la metodología racional.

4.1 Método AASTHO 93

La metodología AASTHO 93, es una metodología empírica para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, desarrollada en una prueba a gran escala en Illinois (Estados Unidos), en los años 50. Esta metodología, es ampliamente usada para el diseño del espesor de las diferentes capas de los pavimentos.

La metodología AASTHO 93 utiliza como criterio de diseño el concepto de serviciabilidad.

La pérdida de serviciabilidad debido a las cargas de tráfico es calculada a través de una ecuación empírica, derivada del experimento desarrollado por la AASHO, en el cual se estudió el comportamiento bajo diferentes condiciones de esfuerzo.

Esta pérdida de serviciabilidad, se da bajo un determinado número de repeticiones de cargas estándar, y bajo los efectos ambientales a los cuales estará sometido el pavimento durante su vida útil.

La siguiente ecuación representa la metodología AASTHO 93, dicha ecuación se utiliza para determinar los espesores de las capas del pavimento.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R(S_0) + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.31 \log_{10}(MR) - 8.07$$

Donde:

- W18 - El tránsito, especificado como el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- PSIo - Nivel de serviciabilidad inicial
- PSIt – Nivel de serviciabilidad final
- Mr - El módulo resiliente de la subrasante
- SN- El número estructural del pavimento (depende de los coeficiente estructurales, coeficientes de drenaje y espesores de cada capa)
- Zr – Nivel de confianza
- So – Desviación estándar

Tránsito de diseño (W18): El tránsito de diseño en la metodología AASHTO 93 se caracteriza por utilizar la metodología de ejes equivalentes. El concepto de ejes equivalente de referencia fue desarrollado a partir de datos obtenidos en el ASSHO Road Test, Illinois (1958-1960).

En dicha prueba, pavimentos contruidos con iguales diseños fueron sometidos a la acción de diferentes cargas y configuraciones de ejes, de manera que pudiera determinarse el efecto producido por cada tipo de eje y carga sobre el deterioro del pavimento, expresado en términos de pérdida del Índice de Servicio Presente (ISP) (Serviciabilidad).

La carga de referencia utilizada por la mayor parte de agencias viales para el diseño y evaluación de pavimentos es un eje simple, con sistema de rueda doble, de 80 kN (18 kips o

8.2 tn) con una presión de inflado 586kPa. A partir de esto, se obtienen los ejes equivalentes de diseño.

Los ejes equivalentes proporcionan una manera de expresar niveles equivalentes de daño entre ejes; sin embargo, resulta más conveniente expresar ese daño en términos de la cantidad de deterioro producida por un determinado vehículo.

Al sumar los daños generados por todos los ejes de un vehículo, se obtiene la cantidad de daño producido por una pasada de dicho vehículo.

Se entiende como factor camión al número de aplicaciones de ejes sencillos estándar, correspondientes al paso de un vehículo comercial.

Serviciabilidad inicial y final: Corresponden a los niveles de serviciabilidad inicial con el que se espera que se abrirá la vía al tránsito en el año cero (0), y la serviciabilidad final corresponde al mínimo nivel de serviciabilidad permitido para el paso de vehículos por la vía, es decir cuando ya la vía haya cumplido con su vida útil.

Estos parámetros dependen principalmente del tipo de pavimento y de la importancia de la vía, de acuerdo con las siguientes tablas.

Tabla 4-1

Valores de serviciabilidad inicial

TIPO DE PAVIMENTO	SERVICIABILIDAD INICIAL
Pavimento en concreto rígido	4.5
Pavimento en concreto asfáltico	4.2

Fuente: propia de los autores

Tabla 4-2

Valores serviciabilidad final

TIPO DE VIA	SERVICIABILIDAD FINAL
Carreteras principales	2.5
Carreteras secundarias	2.0
Condición de falla	1.5

Fuente: propia de los autores

Número estructural (SN): El número estructural de pavimento representa el soporte del pavimento en función a sus módulos elásticos, los espesores de las capas y condiciones de drenaje. Este valor combina dichas variables para dar un valor representativo del soporte del pavimento necesario para resistir las cargas de diseño durante el periodo de diseño y niveles de serviciabilidad permitidos.

El número estructura se define mediante la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Donde:

a_i = Coeficiente estructural de la capa i , el cual depende de la característica del material con que ella se construya.

D_i = Espesor de la capa i en pulgadas.

m_i = Coeficiente de drenaje de la capa i .

Los coeficientes estructurales (a_i) Son utilizados para convertir los espesores de cada capa en un componente del número estructural. Dependen del módulo de elasticidad de la capa, según las siguientes indicaciones.

Coeficiente estructural de la capa asfáltica (a_1)

Para la capa asfáltica, El manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS incorporó en su desarrollo un valor diferencial del coeficiente estructural de las capas asfálticas en función de la temperatura del sitio, en término de la temperatura del aire, así:

Tabla 4-3

Recomendación de coeficientes estructurales según INVIAS

$a_1 = 0.44$	para sitios donde la temperatura promedio ponderada del aire (TMAP) es menor de 13°C
$a_1 = 0.37$	donde TMAP está entre 13 y 20°C
$a_1 = 0.30$	donde TMAP está entre 20 y 30°C

Fuente: propia de los autores

Coeficiente estructural de la Base (a_2)

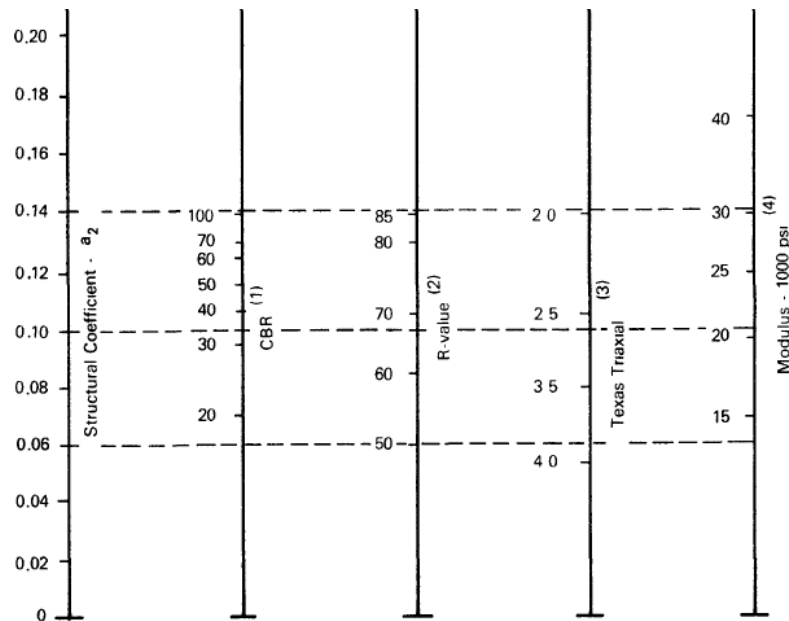


Figura 4-1. Abaco para determinar el coeficiente estructural y de la base granular. Fuente: propia de los autores

Coeficiente estructural de la subbase (a_3)

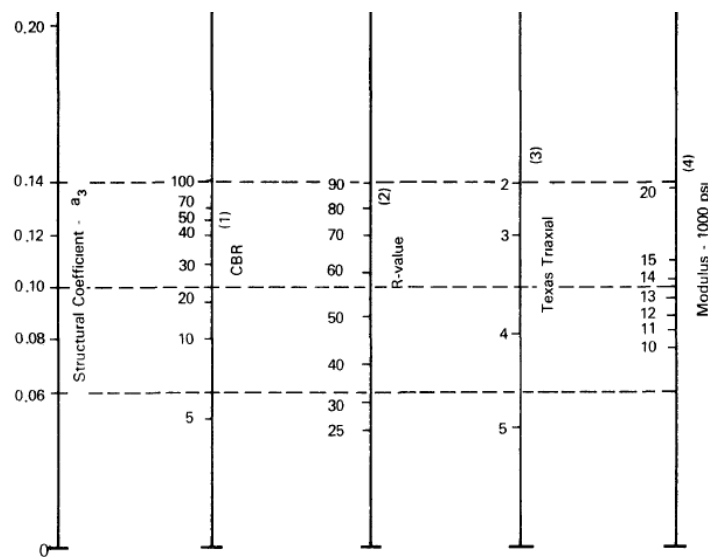


Figura 4-2. Abaco para determinar el coeficiente estructural y de la subbase granular. Fuente: propia de los autores

Los coeficientes de drenaje representan la capacidad de drenaje de las capas que conforman el pavimento. Para el caso de la capa asfáltica, la metodología AAHSTO recomienda un

coeficiente de drenaje de 1, sin embargo, para las capa granulares, recomienda según la siguiente tabla:

Tabla 4-4

Coeficientes de drenaje mi (recomendados por AASHTO 93)

Calidad del drenaje	El agua libre se remueve en...	Copiar en la estructura			
Excelente	2 horas	Cancelar			
Bueno	1 día				
Aceptable	1 semana				
Pobre	1 mes				
Muy pobre	El agua no drenará				

Calidad	Bueno
Coeficiente (m)	1.00

Calidad del drenaje	% del tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a humedades cercanas a la saturación			
	Menos del 1%	1 - 5%	5 - 25%	Más del 25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Aceptable	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Fuente: propia de los autores

Modulo resiliente de la subrasante (M_r): La subrasante, es el material de apoyo natural, sobre el cual se cimenta la estructura de pavimento. Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico. Estas cargas dinámicas representan ciclos de carga y descarga a la estructura de pavimento, dicho comportamiento puede evaluarse con la respuesta resiliente del material.

Las propiedades elásticas o resilientes de capas no ligadas son determinadas usando pruebas triaxiales de cargas repetidas.

Es importante anotar que los resultados del Módulo Resiliente son influenciados principalmente por tres factores:

- Estado de tensiones (esfuerzo confinamiento y esfuerzo desviador).
- Tipo de suelo y estructura Inter particular (métodos de compactación).
- Estado físico del suelo (humedad y densidad).

Existen correlaciones para obtener el módulo resiliente de manera rápida, a través de ensayos sencillos como el del CBR (California Bearing Ratio)

El valor de soporte (CBR 0% a 100%) es un ensayo comúnmente usado en Colombia para caracterización de la capacidad de carga de la subrasante, el cual se expresa en porcentaje entre la relación que existe entre el esfuerzo del suelo estudiado y el esfuerzo de un suelo patrón, el cual es una roca triturada (excelente capacidad de carga)

Para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante y los materiales granulares, en el presente proyecto, se hará uso de la correlación desarrollada en el Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL), la cual se presenta a continuación:

$$M_r = 2555CBR^{0.64}$$

Donde

M_r : Modulo resiliente en psi

Confiabilidad y niveles de confianza: Representa los valores de confianza del análisis estadístico derivado al momento del desarrollo de la ecuación de la AASHTO provenientes de los resultados de ensayos a gran escala realizados previamente.

Estos valores de niveles de confianza dependerán de tipo de vía a usar, según la siguiente recomendación de la metodología AASHTO 93.

Tabla 4-5

Valores recomendados de confiabilidad según AASHTO 93

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	CONFIABILIDAD SUGERIDA %	
	URBANO	RURAL
Interestatal y otras autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Fuente: propia de los autores

Desviación estándar: De igual manera a la confiabilidad, este valor es procedente de un análisis estadístico derivado al momento del desarrollo de la ecuación de la AASHTO resultantes de los ensayos a gran escala realizados previamente.

Particularmente, este valor considera la variación o no en la proyección del tránsito, los valores recomendados por la AASHTO se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4-6

Valores recomendados de desviación estándar según AASHTO 93

CASO DE ANÁLISIS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR TOTAL S_o	
	PAVIMENTO FLEXIBLE	PAVIMENTO RIGIDO
Rango	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Considerando la varianza del tránsito futuro	0.49	0.39
Sin considerar la varianza del tránsito futuro	0.44	0.34

Fuente: propia de los autores

4.2 Método racional diseño de pavimentos flexibles

En Colombia, a lo largo de los años se han venido usando metodológicas empíricas para diseño de estructuras de pavimento flexibles, tales como la metodología AASHTO 93, sin embargo, estos diseños en su mayoría están acompañados con una verificación con la metodología racional de diseño de pavimentos asfáltico, la cual es una metodología empírico mecanicista, que se basa en el cálculo de esfuerzo y deformaciones para determinar la vida por fatiga y por ahuellamiento en estructuras de pavimentos asfálticos.

Uno de los modos de fallas mas antiguos en pavimento flexible es la fatiga (Moghaddam, et al, 2011). La fatiga en pavimento flexible son las grietas ocasionadas en el inferior de la carpeta asfáltica que con el tiempo se reflejan en la superficie, ya sea de manera longitudinal, transversal y que luego pueden llegar convertirse en un sistema de grietas conocida como piel de cocodrilo. La vida por fatiga en pavimento se rige por las deformaciones a tensión generadas en el fondo de la carpeta asfáltica, debido a que si las deformaciones generadas por el tránsito vehicular, supera a la deformación máxima permitida por el concreto asfáltico, se fatiga el pavimento.

Por otro lado, el ahuellamiento es una manifestación tanto de la deformación permanente, como una forma de deterioro en los pavimentos flexibles, el diseño del pavimento debe orientarse a eliminar o reducir la formación de ahuellamiento en el pavimento durante un período determinado. El criterio de ahuellamiento se basa en limitar la deformación vertical producida en la parte superior de la subrasante, debido a que, si la deformación aplicada es superior a la deformación permitida por la subrasante, se produce ahuellamiento. (Ekwulo & Eme, 2009)

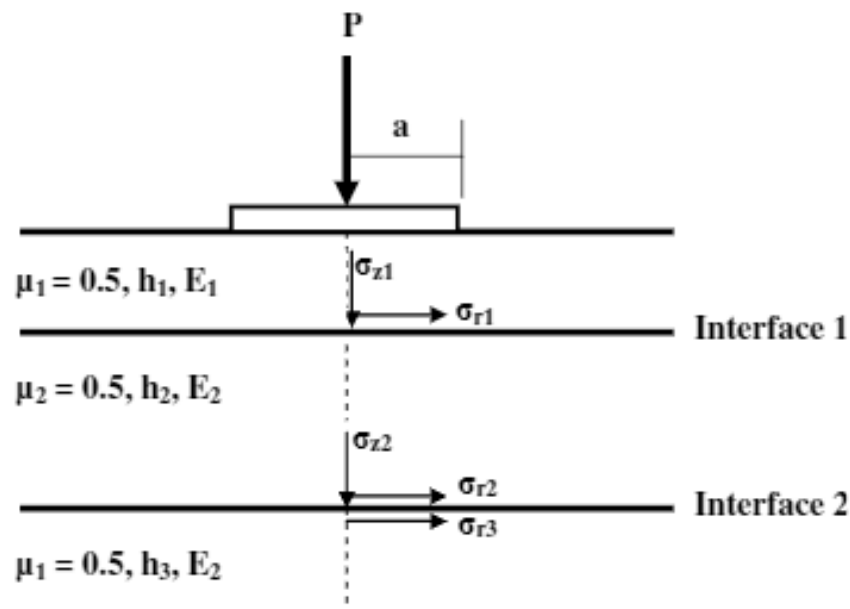


Figura 4-3 Análisis de carga metodología racional Fuente: propia de los autores

A partir de los esfuerzos y deformaciones calculados, se hacen uso de ecuaciones de transferencia, para calcular el número de repeticiones de vida útil por fatiga y ahuellamiento

De manera general, la vida por fatiga se rige según la siguiente ecuación de transferencia:

$$NF = f_1 \varepsilon_r^{-f_2} E_1^{f_3}$$

Mientras que la vida por ahuellamiento se rige según la siguiente ecuación de transferencia:

$$NA = f_4 \varepsilon_z^{-f_5}$$

Donde:

N_F Representa el número repeticiones de falla por fatiga

N_R Representa el número repeticiones de falla por ahuellamiento

ε_r Deformación unitaria a tensión fondo carpeta asfáltica

ε_z Deformación unitaria a compresión encima de la subrasante

E_1 Modulo elasticidad mezcla asfáltica

f Coeficientes de calibración

A lo largo de los años diversos autores han calibrados ecuaciones de transferencia para fatiga y ahuellamiento, las cuales se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 4-7

Factores de calibración ecuaciones vida por Fatiga

No	Organización	f_1	f_2	f_3
1	Asphalt Institute	0.0795	3.291	0.854
2	Shell Research	0.0685	5.671	2.363
3	US Army Corps of Engineers	479.156	5	2.66
4	Belgian Road Research Center	4.92E-14	4.76	0
5	Transport and Road Research Laboratory	1.66E-10	4.32	0
6	Federal Highway Administration	0.1001	3.565	1.474
7	Illinois DOT	5.00E-06	3	0
8	Austin Research Engineers (ARE)	0.4875	3.0312	0.06529

Fuente: Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012

Tabla 4-8

Factores de calibración ecuaciones vida por Fatiga

No	Organización	f_4	f_5
----	--------------	-------	-------

1	Asphalt Institute	1.365E-09	4.477
2	Shell Research	6.15E-07	4
3	US Army Corps of Engineers	1.81E-15	6.527
4	Belgian Road Research Center	3.05E-09	4.35
5	Transport and Road Research Laboratory	1.13E-06	3.75

Fuente: Adaptado de Ebrahim & Behiry, 2012

5. Metodología

Para este proyecto, se escogieron distintos niveles de tránsito, características de materiales, subrasante y clima. Con estas variables, se realizará el diseño de pavimento con la metodología AASTHO 93 para determinar los espesores de pavimento.

Una vez teniendo espesores de pavimento, se propone calcular los esfuerzos y deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica (Fatiga) y encima de la subrasante (Ahuellamiento) con la metodología lineal elástica y metodología viscoelástica.

El siguiente cuadro explica la metodología del proyecto.

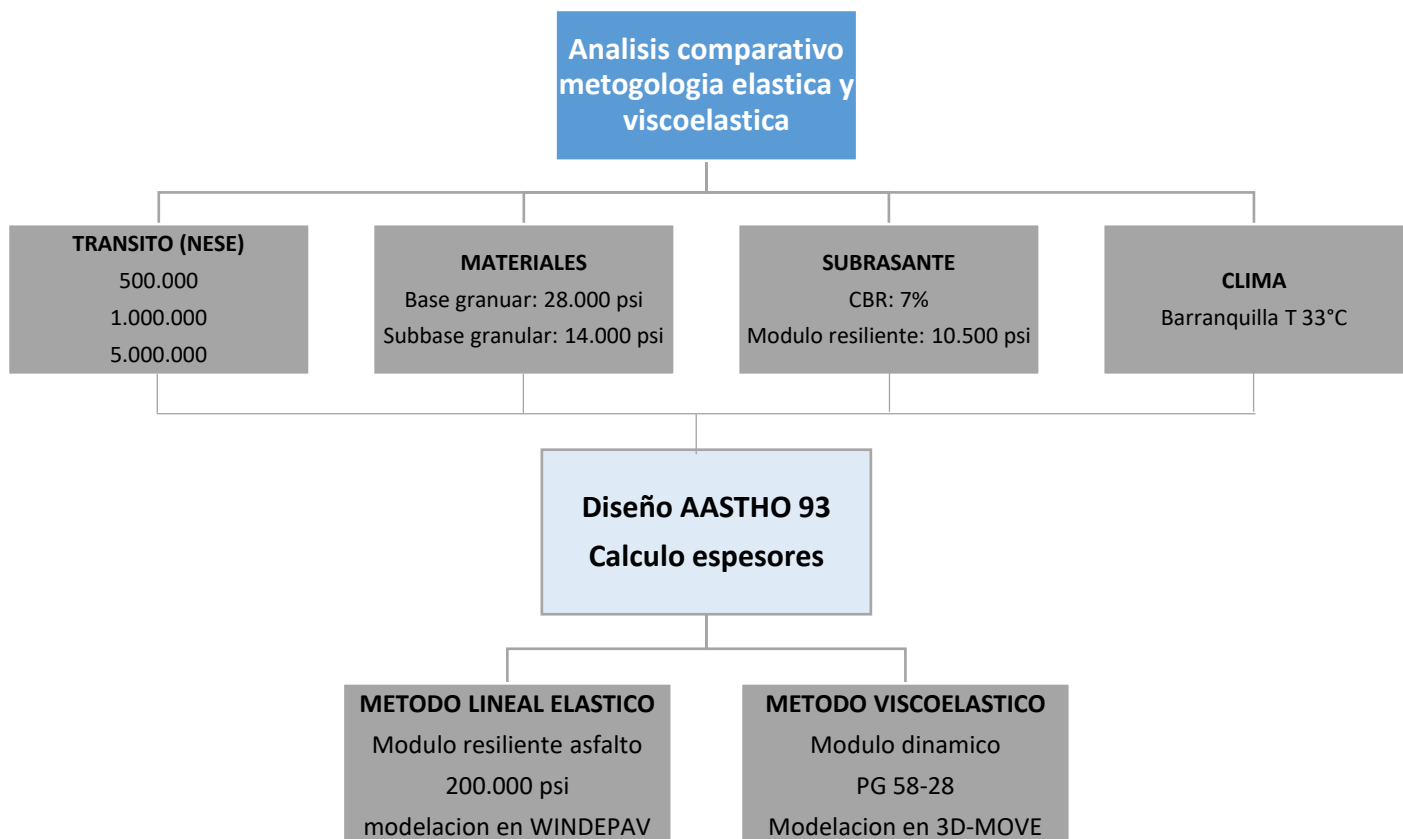


Figura 5-1 Metodología del proyecto. Fuente: propia de los autores

5.1 Tránsito de diseño

Con el fin de evaluar distintas categorías del tránsito, se asumen tres categorías de tránsito en termino de numero de repeticiones de ejes equivalentes de 80 kN, los cuales son:

- 500.000 ejes equivalentes
- 1.000.000 ejes equivalentes
- 5.000.000 ejes equivalentes

5.2 Materiales

Para los materiales, se utilizan base y subbase granular. Para estos materiales se establecen los siguientes módulos de elasticidad y coeficiente estructura (AASHTO) según la recomendación de la AASHTO.

- Base granular: Modulo resiliente de 28.000 psi y a2 (0.14)
- Subbase granular: Modulo resiliente de 14.000 psi y a3 (0.10)

5.3 Subrasante

Para la subrasante, se asume con un valor de soporte de CBR de 7% y se utiliza la siguiente correlación (Heukelom & Klomp, 1962) para establecer el módulo resiliente de la subrasante:

$$Mr = 1500CBR = 1500 * 7 = 10.500 \text{ psi}$$

5.4 Clima

Para las condiciones climáticas, se establece el diseño e la ciudad de Barranquilla donde se tiene una temperatura media anual superior a los 30°C.

5.5 Modelo lineal elástico

Para el modelo lineal elástico, se utilizará el software desarrollado por el Ing. Luis Ricardo Vázquez (WINDEPAV) para calcular esfuerzos y deformaciones en pavimentos flexibles bajo el modelo lineal elástico.

Para la implementación de este modelo, se hace necesario conocer el modulo de elasticidad del asfalto en las condiciones climatológicas de la zona.

La siguiente figura presenta la temperatura promedio máxima en la ciudad de barranquilla (Tomado de CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas). En la cual, se puede observar temperaturas máximas de 33 °C, la cual se tomará como el valor más crítico para calcular el módulo de elasticidad del asfalto.

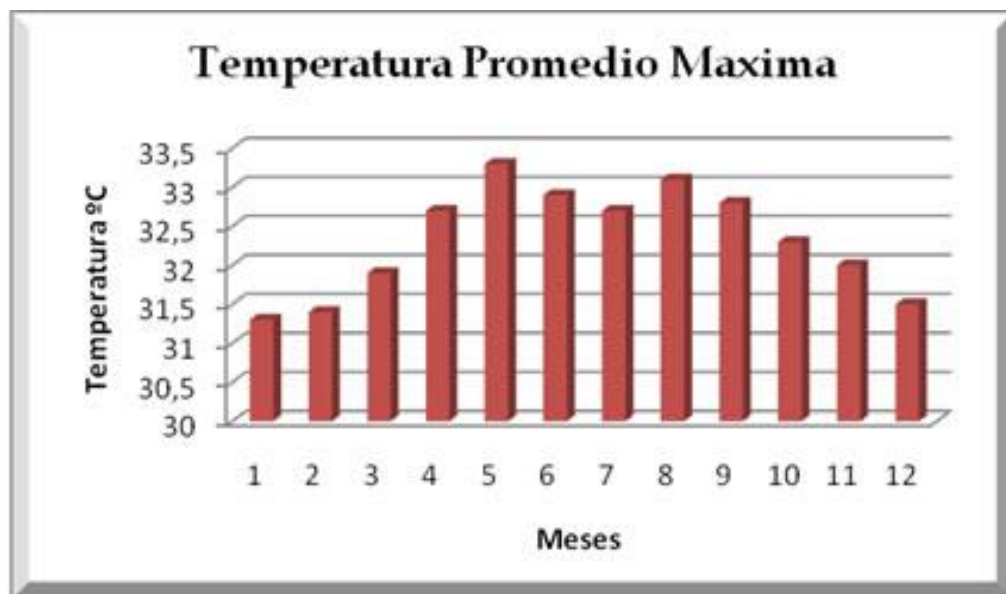


Figura 5-2. Temperatura promedio máxima Barranquilla, tomado de CIOH. Fuente: propia de los autores

Por tanto, se debe determinar el módulo elástico del asfalto a la mayor temperatura (33 °C). Para esto se utilizó los nomogramas de van de Poel y Bonnaure, obteniendo los siguientes resultados:

BitProps - Single Point

File Options Help

Step 1). PI from pen

Properties	Penetration Index
pen 60	PI 0.43515
Tpen 25 (C)	
sprb 55 (C)	

calculate PI

$$a = (\log_{10}(800) - \log_{10}(\text{pen})) / (\text{sprb} - \text{tpen})$$

$$PI = (20 - 500a) / (1 + 50a)$$

Step 2). van de Poel

Properties & Conditions	Bitumen Stiffness, MPa
PI 0.43515	Sbit 4.048
sprb 55 (C)	
Temp 33 (C)	
Time 0.01 sec	

calculate Sbit

Step 3). Bonnaure et. al.

Bitumen Stiffness and Mix Volumetrics	Mixture Stiffness, MPa
S.bit 4.048 MPa	S.Mix 1366.13
Va 4%vol	Phase Angle, deg.
Vb 10%vol	phi.Mix 38.65

S.Mix, phi.Mix

This window can be used to generate Mixture properties for a single set of conditions, or to examine individual bitumen and mixture properties. Switch to 'Frequency Sweep' to generate Mixture Properties over a range of frequencies and save them to a file.

Switch to Frequency Sweep Exit

Figura 5-3. Resultado módulo de elasticidad asfalto. Fuente BitProps

Obteniendo como resultado 1366 MPa, o lo equivalente aproximadamente a 200.000 psi de modulo elástico del asfalto.

5.6 Modelo viscoelástico

Para le modelo viscoelástico, se utilizará el software desarrollado por la Universidad de Nevada (3D – Move Anaysis), el cual permite calcular los esfuerzos y deformaciones en pavimento asfaltico, teniendo en cuenta las propiedades viscoelástica del material asfaltico.

Para el concreto asfaltico, se utilizó la siguiente curva maestra, la cual representa el modulo dinámico del asfalto a cierta temperatura y frecuencia (Velocidad).

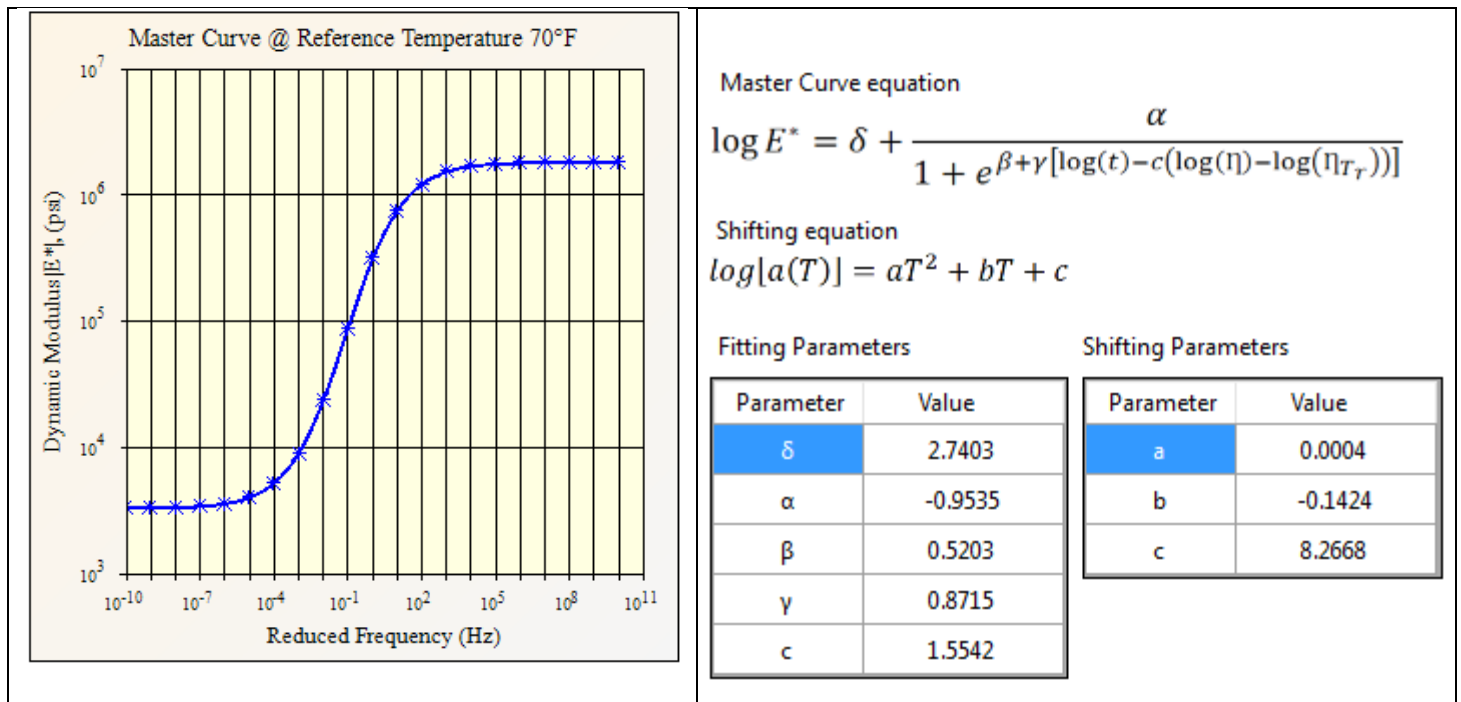


Figura 5-4. Curva maestra asfalto PG 58-28. Fuente 3D Move

Para este cálculo, se utilizará una temperatura de 33°C y se tomará una velocidad constante de 60 km/h.

6. Resultados

6.1 Diseño AASHTO 93

En primer lugar, se realizó el diseño de pavimento flexible por la metodología de la AASHTO 93, con el fin de calcular los espesores de pavimento para cada uno de los niveles de tránsito presentes en el proyecto.

La siguiente tabla, resume otras variables escogidas para realizar el diseño por la metodología AASHTO 93.

Tabla 6-1

Variables de diseño AASHTO 93

VARIABLE		VALOR	COMENTARIO
Confiabilidad	R%	95%	Vías principales
Desviación estándar	So	0.49	Considerando varianza del tránsito
Serviciabilidad inicial	PSI Inicial	4.2	Pavimento asfáltico
Serviciabilidad final	PSI Final	2.5	Vías principales
Modulo resiliente subrasante	MR	10.500	Correlación CBR del 9%
Coefficiente estructural asfalto	a1	0.3	Recomendado por INVIAES para temperaturas entre 20-30 grados Celsius
Coefficiente estructural base	a2	0.14	Recomendando por AASHTO para base granular de 28.000 psi
Coefficiente estructural subbase	a3	0.10	Recomendando por AASHTO para subbase granular de 14.000 psi
Coefficiente de drenaje asfalto	m1	1	Recomendado por AASTHO para el asfalto
Coefficiente de drenaje base	m2	1	Valor escogido
Coefficiente de drenaje subbase	m3	1	Valor escogido

Fuente: elaboración propia

A partir de las variables de diseño presentadas anteriormente, se procedió a calcular los espesores requeridos, mediante la metodología AASHTO 93 para diseño de pavimentos flexibles con el software de Método AASHTO para el diseño de pavimentos desarrollado por

el Ing. Luis Ricardo Vázquez, para cada uno de los niveles de tránsito del proyecto, como se presenta a continuación.

Estructura 1

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vázquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vázquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:
☒ Flexible
☐ Rígido

Confiability (R) and standard deviation (So):
 90 % Zr = -1.282
 So: 0.49

Serviciabilidades inicial y final:
 PSI inicial: 4.2
 PSI final: 2.5

Tránsito de diseño:
 W18: 500000

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Epesor D (plg.)	Epesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	200000	¿E/a?	0.30	1	¿m?	1.90	6.33 6.5 6.5 1.95
2	28000	¿E/a?	0.14	1	¿m?	2.49	3.86 4.0 4.0 0.56
3	14000	¿E/a?	0.10	1	¿m?	2.78	2.70 3.0 6.0 0.60
4	10500	MR					3.11 OK

W18 real: 9.91E+005

Cálculo de W18 para un SN:
 SN: W18:

☐ Quitar el control de variables

Botones: Diseñar, Ver informe, Salir

Figura 6-1. Calculo AASHTO 93 Estructura 1. Fuente AASHTO

Estructura 2

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vázquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)

Desarrollado por: Luis Ricardo Vázquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: ☒ Flexible ☐ Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.49 Ayuda

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial: 4.2 PSI final: 2.5 Ayuda

Tránsito de diseño: W18: 1000000

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	200000	$E/a?$ 0.30	1 $m?$	2.14	7.13 7.5	7.5	2.25
2	28000	$E/a?$ 0.14	1 $m?$	2.79	3.86 4.0	6.0	0.84
3	14000	$E/a?$ 0.10	1 $m?$	3.12	0.30 0.5	6.0	0.60
4	10500	MR					3.69 OK

W18 real: 2.81E+006

Cálculo de W18 para un SN: SN: W18:

☐ Quitar el control de variables Salir

Figura 6-2. Calculo AASHTO 93 Estructura 2. Fuente AASHTO

Estructura 3

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vázquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)

Desarrollado por: Luis Ricardo Vázquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: ☒ Flexible ☐ Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 90 % $Z_r = -1.282$ So: 0.49 Ayuda

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial: 4.2 PSI final: 2.5 Ayuda

Tránsito de diseño: W18: 5000000

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	200000	$E/a?$ 0.30	1 $m?$	2.79	9.30 9.5	9.5	2.85
2	28000	$E/a?$ 0.14	1 $m?$	3.64	5.64 6.0	6.0	0.84
3	14000	$E/a?$ 0.10	1 $m?$	4.05	3.60 4.0	6.0	0.60
4	10500	MR					4.29 OK

W18 real: 7.30E+006

Cálculo de W18 para un SN: SN: W18:

☐ Quitar el control de variables Salir

Figura 6-3. Calculo AASHTO 93 Estructura 3. Fuente AASHTO

La siguiente figura resume los espesores de diseños obtenidos (Convertidos de pulgadas a centímetros).

<u>ESTRUCTURA 1</u>		<u>ESTRUCTURA 2</u>		<u>ESTRUCTURA 3</u>	
500.000 ejes		1.000.000 ejes		5.000.000 ejes	
CONCRETO ASFALTICO MR 200000 psi	17 cm	CONCRETO ASFALTICO MR 200000 psi	19 cm	CONCRETO ASFALTICO MR 200000 psi	24 cm
BASE GRANULAR MR 28000 psi	10 cm	BASE GRANULAR MR 28000 psi	15 cm	BASE GRANULAR MR 28000 psi	15 cm
SUBBASE GRANULAR MR 14000 psi	15 cm	SUBBASE GRANULAR MR 14000 psi	15 cm	SUBBASE GRANULAR MR 14000 psi	15 cm
SUBRASANTE NATURAL MR 10500 psi		SUBRASANTE NATURAL MR 10500 psi		SUBRASANTE NATURAL MR 10500 psi	

Figura 6-4. Espesores obtenidos de AASHTO 93. Fuente elaboración propia

6.2 Análisis lineal elástico

Una vez obtenido los espesores de diseño para cada estructura, se procedió a utilizar el software WINDEPAV desarrollado por el Ing. Luis Ricardo Vázquez, para calcular las deformaciones a tensión en el fondo de la carpeta asfáltica (Fatiga) y deformación a compresión encima de la subrasante (Ahuellamiento) mediante un análisis lineal elástico.

La geometría y cargas aplicadas para el análisis elástico multicapa se presentan a continuación (WindePAV):

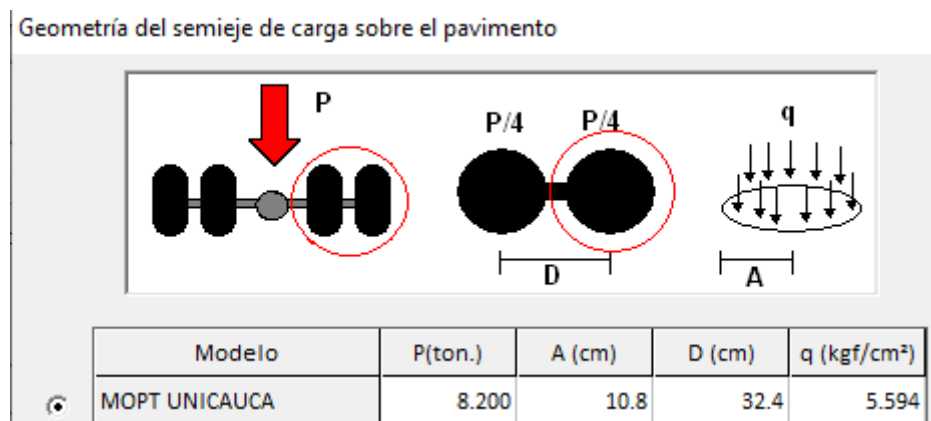


Figura 6-5. Carga y geometría del eje. Fuente WindePAV

Estructura 1

Descripción del proyecto												TRABAJO DE GRADO		
Sistema de carga						Posición del valor máximo para una carga				Gráficos de respuesta				
Radio de las ruedas (cm)						10.80				A Bajo una rueda simple				
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)						32.40				B Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²)						5.594				C Al centro de la carga				
Exportar resultados a Excel (csv)														
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.														
Número de capas: 4						Tracción (fatiga)				Compresión				
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño			
1	1.406E+04	0.30	0.00	8.545E+00	5.598E+00	331.0	B		-154.0	C				
Continúa						17.00	-4.833E+00	B	1.050E+00	B	-287.0	C	4.3801E+04	11.415
2	1.969E+03	0.40	17.00	-1.632E-01	1.050E+00	-287.0	C		563.0	B				
Continúa						27.00	-4.874E-01	C	6.057E-01	C	-308.0	C		
3	9.840E+02	0.40	27.00	-4.181E-02	6.057E-01	-308.0	C		470.0	C				
Continúa						42.00	-1.030E-01	C	3.916E-01	C	-236.0	C		
4	7.383E+02	0.45	42.00	2.407E-02	3.916E-01	-236.0	C		468.0	C				
									486.0	C	1.1024E+07	0.045		
Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)												52.36		
Radio de curvatura (m)												173.85		
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)												9103.0		
Salir y descartar los resultados														

Figura 6-6. Resultado de deformación estructura 1. Fuente WindePAV

Estructura 2

Resultados del análisis														
Archivo														
Descripción del proyecto												TRABAJO DE GRADO		
Sistema de carga						Posición del valor máximo para una carga				Gráficos de respuesta				
Radio de las ruedas (cm)						10.80				A Bajo una rueda simple				
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)						32.40				B Bajo una de las ruedas de la carga				
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²)						5.594				C Al centro de la carga				
Exportar resultados a Excel (csv)														
Respuestas estructurales en las interfases y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.														
Número de capas: 4						Tracción (fatiga)				Compresión				
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño			
1	1.406E+04	0.30	0.00	7.852E+00	5.598E+00	292.0	B		-136.0	C				
Continúa						19.00	-4.069E+00	B	9.351E-01	B	-246.0	C	9.4671E+04	5.281
2	1.969E+03	0.40	19.00	-1.030E-01	9.351E-01	-246.0	C		488.0	B				
Continúa						34.00	-3.987E-01	C	4.630E-01	C	-236.0	C		
3	9.840E+02	0.40	34.00	-4.487E-02	4.630E-01	-236.0	C		377.0	C				
Continúa						49.00	-8.566E-02	C	3.069E-01	C	-186.0	C		
4	7.383E+02	0.45	49.00	1.458E-02	3.069E-01	-186.0	C		372.0	C				
									388.0	C	2.7136E+07	0.018		
Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)												47.13		
Radio de curvatura (m)												209.39		
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)												9869.0		
Salir y descartar los resultados														

Figura 6-7. Resultado de deformación estructura 2. Fuente WindePAV

Estructura 3

Descripción del proyecto		TRABAJO DE GRADO	
Sistema de carga		Posición del valor máximo para una carga	Gráficos de respuesta
Radio de las ruedas (cm)	10.80	A Bajo una rueda simple	Exportar resultados a Excel (csv)
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)	32.40	B Bajo una de las ruedas de la carga	
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm ²)	5.594	C Al centro de la carga	

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.											
Número de capas: 4						Tracción (fatiga)			Compresión		
No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Épsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	1.406E+04	0.30	0.00	6.965E+00	5.598E+00	243.0			-101.0		
	Continua		24.00	-3.120E+00	6.485E-01	-193.0	3.1850E+05	1.570	165.0		
2	1.969E+03	0.40	24.00	-1.224E-01	6.485E-01	-193.0			357.0		
	Continua		39.00	-3.131E-01	3.518E-01	-179.0			294.0		
3	9.840E+02	0.40	39.00	-3.916E-02	3.518E-01	-179.0			377.0		
	Continua		54.00	-6.608E-02	2.396E-01	-144.0			292.0		
4	7.383E+02	0.45	54.00	1.234E-02	2.396E-01	-144.0			305.0	7.1068E+07	0.007

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)	40.85
Radio de curvatura (m)	256.50
Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100)	10478.0

Salir y descartar los resultados

Figura 6-8. Resultado de deformación estructura 3. Fuente WindePAV

La siguiente tabla resume los resultados en función a la deformación por fatiga y ahuellamiento

Tabla 6-2

Deformaciones calculadas con el análisis lineal

NIVEL TRANSITO	ESTRUCTURA 1	ESTRUCTURA 2	ESTRUCTURA 3
Fatiga	-287.0	-246.0	-193.0
Ahuellamiento	486.0	388.0	305.0

Fuente WindePAV

6.3 Análisis viscoelástico

Teniendo las estructuras previamente calculadas, se procedió a realizar el análisis viscoelástico mediante el software 3D-move analisis de la universidad de Nevada con el fin de calcular las deformaciones a tensión en el fondo de la carpeta asfáltica (Fatiga) y deformación a compresión encima de la subrasante (Ahuellamiento) mediante un análisis lineal viscoelástico.

Cabe resaltar que se mantuvo las mismas características de carga y geometría de los ejes.

La siguiente imagen presenta un screenshot de los resultados obtenidos para fatiga y ahuellamiento en el software 3D-move

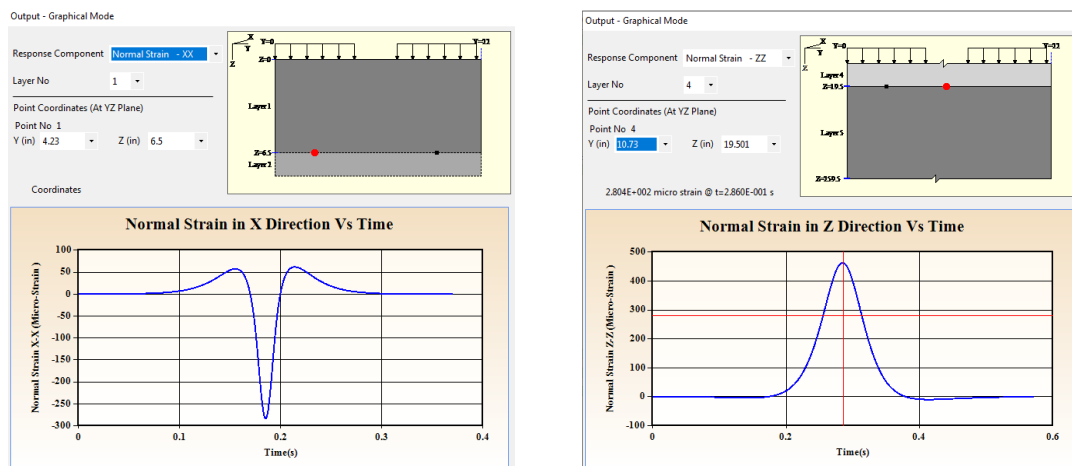


Figura 6-9. Resultados deformaciones 3D Move. Fuente 3D Move Analysis

Este análisis se realizó para una temperatura de 33°C y para diferentes rangos de velocidades (Dado que es un análisis dinámico) entre 20 y 100 kph.

Los resultados de las deformaciones a tensión en el fondo de la carpeta asfáltica y a compresión encima de la subrasante se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6-3

Deformaciones calculadas con el análisis viscoelástico

DEFORMACION	ESTRUCTURA 1	ESTRUCTURA 2	ESTRUCTURA 3	VELOCIDAD
Fatiga	-350	-291	-235	20 KPH
Ahuellamiento	627	500	425	
Fatiga	-311	-256	-206	40 KPH
Ahuellamiento	580	461	388	
Fatiga	-283	-236	-189	60 KPH
Ahuellamiento	555	440	365	
Fatiga	-266	-222	-176	80 KPH
Ahuellamiento	535	420	350	
Fatiga	-254	-210	-168	100 KPH
Ahuellamiento	521	414	339	

Fuente: elaboración propia

6.4 análisis de resultados

Con el fin de realizar en análisis comparativo de ambas metodologías, se procedió a tabular en una misma tabla los resultados del análisis lineal elástico y viscoelástico. Asimismo, se graficaron dichos resultados, como se pueden ver en la siguiente tabla y graficas.

Tabla 6-4

Cuadro comparativo de deformaciones

DEFORMACION	ESTRUCTURA 1	ESTRUCTURA 2	ESTRUCTURA 3	TIPO DE ANALISIS
Fatiga	-287	-246	-193	LINEAL ELASTICO
Ahuellamiento	486	388	305	
Fatiga	-350	-291	-235	Viscoelástico 20 KPH
Ahuellamiento	627	500	425	
Fatiga	-311	-256	-206	Viscoelástico 40 KPH
Ahuellamiento	580	461	388	
Fatiga	-283	-236	-189	Viscoelástico 60 KPH
Ahuellamiento	555	440	365	
Fatiga	-266	-222	-176	Viscoelástico 80 KPH
Ahuellamiento	535	420	350	
Fatiga	-254	-210	-168	Viscoelástico 100 KPH
Ahuellamiento	521	414	339	

Fuente: elaboración propia

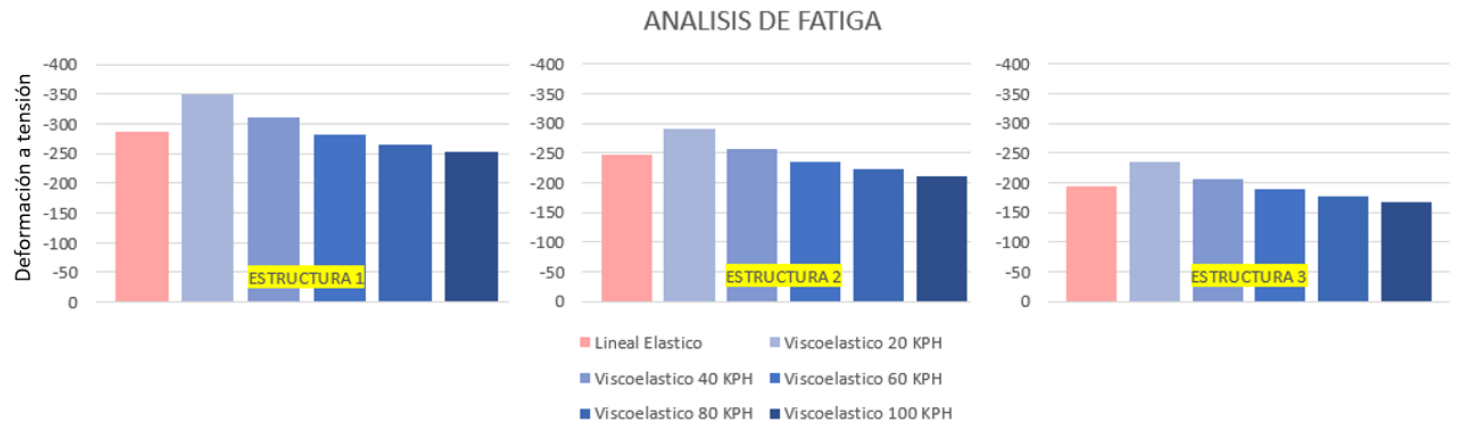


Figura 6-11. Análisis de fatiga

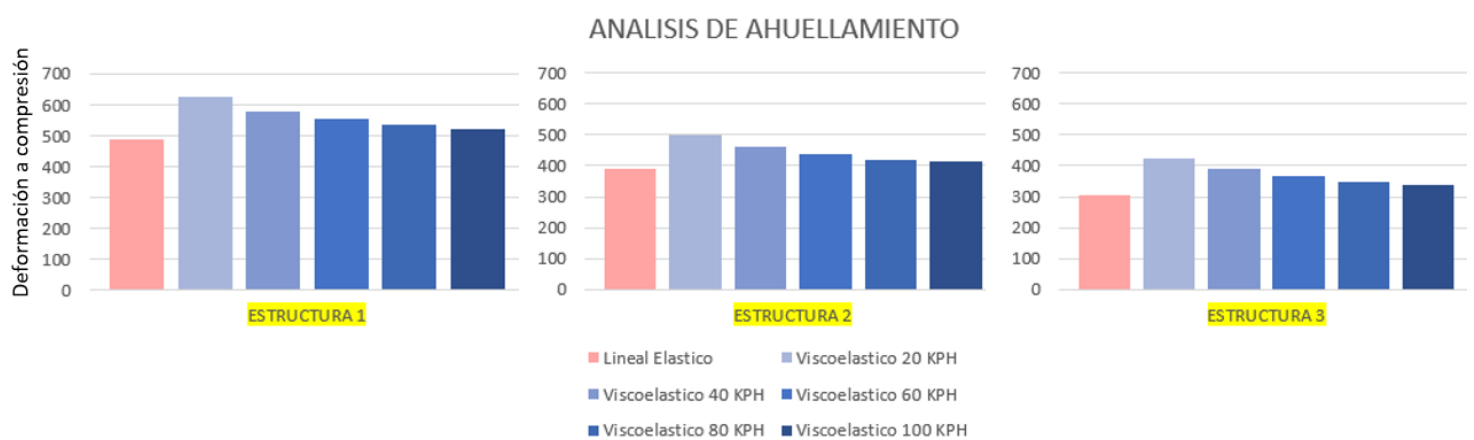


Figura 6-10. Análisis de ahuellamiento. Fuente: elaboración propia

Cómo se puede observar en la tabla y graficas anteriores, en el análisis de fatiga, se puede ver que en el análisis lineal elástico arroja unos resultados similares al análisis viscoelástico cuando este último se analiza a velocidades similares a 60 kph.

También, es importante aclarar que cuando el análisis se realiza a bajas velocidad, se obtiene una mayor deformación en el sistema viscoelástico en comparación con el elástico, dado que, a menor velocidad, el asfalto se desempeña con un menor modulo dinámico (Mora, O, 2016) y por tanto se generan más deformaciones.

Caso contrario sucede a altas velocidades, donde el asfalto bajo análisis viscoelástico presenta más modulo dinámico y por tanto menos esfuerzo.

Por tanto, se demuestra la importancia de trabajar con un sistema viscoelástico que represente el comportamiento del asfalto a diferentes velocidad (dependiendo de la velocidad del proyecto), dado que como se puede ver en los resultados, este no es un valor constante.

En el caso del ahuellamiento, el análisis elástico arroja un valor inferior a cualquier análisis viscoelástico, quiere decir, que en todos los casos el ahuellamiento bajo el análisis elástico esta subestimado, dado que simulando el comportamiento real del asfalto (viscoelástico) los valores dan aún mayor.

Asimismo, similar a la fatiga vemos la influencia de las bajas y altas velocidades en la respuesta del material asfaltico en cuanto a deformaciones, por tanto, es importante a la hora de hacer un diseño de pavimentos realizar el análisis de esfuerzos y deformaciones teniendo en cuenta las propiedades viscoelásticas del material asfaltico, la temperatura y la velocidad de diseño de la vía.

7. Conclusiones y recomendaciones

En Colombia, en su mayoría los diseños de pavimentos flexibles se realizan con el método de la AASHTO 93, para determinar los espesores de la estructura y posteriormente se realiza un chequeo por la metodología racional en la cual se calculan esfuerzos y deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica y encima de la subrasante con el fin de estimar la vida útil del pavimento por fatiga y ahuellamiento respectivamente.

Sin embargo, estos análisis para determinar los esfuerzos y deformaciones en las estructuras diseñadas por AAHTO se realizan con softwares y modelos lineales elásticos, los cuales simulan el material asfaltico como material con comportamiento lineal elástico, caracterizado con un modulo de elasticidad constante. No obstante, en la vida real se sabe que el asfalto tiene un comportamiento viscoelástico caracterizado con un módulo dinámico a través de una curva maestra, dicho comportamiento es distinto al asumido actualmente bajo métodos lineales elástico.

Es así que en esta investigación se analizaron 3 distintas estructuras de pavimento basada en 3 niveles de transito; y para estas estructuras se realizó el diseño por la metodología AASHTO 93 para determinar los espesores y luego se procedió a determinar las deformaciones en el fondo de la carpeta asfáltica (fatiga) y encima de la subrasante (Ahuellamiento), obteniendo como resultado los siguientes análisis:

En el caso de la fatiga, se encontró que el análisis lineal elástico arroja unos resultados similares al análisis viscoelástico cuando este último se analiza a velocidades similares a 60 kph.

Sin embargo, cuando el análisis viscoelástico se realiza a bajas velocidad, se obtiene una mayor deformación en el sistema viscoelástico en comparación con el elástico, dado que, a menor velocidad, el asfalto se desempeña con un menor modulo dinámico (Mora, O, 2016) y por tanto se generan más deformaciones. En este caso se estaría subestimado el comportamiento del pavimento si tenemos bajas velocidades y realizamos el análisis con el modelo lineal elástico.

Caso contrario sucede a altas velocidades, donde el asfalto bajo análisis viscoelástico presenta más modulo dinámico y por tanto menos esfuerzo. En este caso se estaría sobreestimando el comportamiento del pavimento si tenemos altas velocidades y realizamos el análisis con el modelo lineal elástico.

Por tanto, se demuestra la importancia de trabajar con un sistema viscoelástico que represente el comportamiento real del asfalto a diferentes velocidad (dependiendo de la velocidad del proyecto), dado que como se puede ver en los resultados, este no es un valor constante.

En el caso del ahuellamiento, el análisis elástico arroja un valor inferior a cualquier análisis viscoelástico, quiere decir, que en todos los casos el ahuellamiento bajo el análisis elástico esta subestimado, dado que simulando el comportamiento real del asfalto (viscoelástico) los valores dan aún mayor.

Asimismo, similar a la fatiga vemos la influencia de las bajas y altas velocidades en la respuesta del material asfaltico en cuanto a deformaciones, por tanto, se hace importante a la hora de realizar un diseño de pavimentos asfalticos obtener una caracterización de la velocidad de la vía y realizar un análisis viscoelástico debido a que representa el comportamiento real en campo.

8. Limitaciones

Como principal limitaciones de esta investigación se resalta que se está comparando un análisis lineal con un análisis viscoelástico, donde las variables de entrada para caracterizar el asfalto son distintas; módulo de elasticidad constante en el análisis lineal y modulo dinámico en el análisis viscoelástico.

Para futuras investigaciones, se hace importante realizar en análisis de resultados cambiando el valor de la temperatura para analizar el comportamiento del asfalto a diferentes temperaturas.

Asimismo, para futuras investigaciones realizar este análisis utilizando diferentes tipos de asfalto; tales como asfalto modificados, mezclas tibias, mezclas recicladas, mezclas frías, entre otros.

9. Referencias

AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.

INVIAS (2014) Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Instituto nacional de Vías - INVIAS

INVIAS. (2008). Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos en carreteras. Bogotá: Instituto nacional de Vías - INVIAS

INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras en Colombia. Bogotá: Instituto nacional de Vías - INVIAS

Huang, Y. H. (1993). Pavement analysis and design.

Behiry, A. E. A. E. M. (2012). Fatigue and rutting lives in flexible pavement. Ain Shams Engineering Journal, 3(4), 367-374

CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas

Radovskiy, B., & Teltayev, B. (2018). Determining of Asphalt Stiffness Modulus. In Viscoelastic Properties of Asphalts Based on Penetration and Softening Point (pp. 23-39). Springer, Cham.

- Nitharsan, R. (2011). Development of Windows-Based Version of the 3D-Move Analysis Software for Pavement Response Analysis (Doctoral dissertation).
- Moghaddam, T. B., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays*, 6(4), 670-682.
- Ekwulo, E. O., & Eme, D. B. (2009). Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(12).
- Nagakumar, N. (2013). Applications of layered theory for the analysis of flexible pavement. *International Journal of Research in Engineering and Technology*
- Mora, O., Murillo, M., Rosanía, T., Castañeda Amashta, A. G., Pinto, R., & Padilla-Muñoz, A. (2020). Analysis of CBR design value selection methods on flexible pavement design: Colombia case study.
- Usman, R. S., Setyawan, A., & Suprpto, M. (2018, March). Prediction of pavement remaining service life based on repetition of load and permanent deformation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 333, No. 1, p. 012089). IOP Publishing.

Mora (2016). Desarrollar de una metodología para diseño de pavimentos que permita incorporar el efecto de la rugosidad en la carga dinámica transmitida al pavimento. Tesis de maestria. Universidad del Norte

Eslaminia, M., Thirunavukkarasu, S., Guddati, M. N., & Kim, Y. R. (2012). Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. In 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements (pp. 497-506). Springer, Dordrecht.

WindePAV software

AASHTO 93 Software

3D- Move Analysis Software